

MODELLEME VE SİMÜLASYON YARDIMIYLA ÇİMENTO ÖĞÜTME DEVRESİ TASARIMI VE KAMARALI BİLYALI DEĞİRMEN SEÇİMİ

Design of Cement Grinding Circuit and Selection of Multi-Compartment Ball Mill with the Aid of Modelling and Simulation

A. Seyfi ERDEM^(*)
Ş. Levent ERGÜN^(**)
A. Hakan BENZER^(***)

ÖZET

Bu çalışmada, çimento öğütmede kullanılan kamaralı bilyalı değirmenlerin seçimi ve devre tasarımı için, Bond bilyalı değirmen öğütülebilirlik testinin modellenmesine dayanan modelleme destekli bir ölçek büyütme yaklaşımı kullanılmıştır. Yaklaşımın başarısı, halen üretim yapmakta olan sekiz farklı çimento öğütme devresinden alınan verilerle değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımla, öğütme devrelerindeki malzeme, tüm akışlardaki tonaj ve tane boyu dağılımları başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Öğütme, Çimento, Kamaralı Bilyalı Değirmen, Ölçek Büyütme, Modelleme ve Simülasyon.

ABSTRACT

In this paper, based on the modelling of Bond ball mill grindability test, a scale up approach which can be used for selection of multi-compartment ball mills and cement grinding circuit design is used. The success of the approach was evaluated by the data taken from eight different operating cement grinding circuits. The flow rates and size distributions of the streams in the circuits were successfully predicted by this method.

Keywords: Grinding, Cement, Multi-Compartment Ball Mill, Scale-up, Modelling and Simulation.

^(*) Arş. Gör., Hacettepe Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü, Beytepe, ANKARA, aserdem@hacettepe.edu.tr

^(**) Prof. Dr., Hacettepe Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü, Beytepe, ANKARA

^(***) Doç. Dr., Hacettepe Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü, Beytepe, ANKARA

1. GİRİŞ

Çimento, enerjinin en yoğun kullanıldığı endüstri dallarından biridir ve bir ton çimento üretiminde ortalama 110 kWh elektrik enerjisi harcanmaktadır. 2004 yılında dünya çimento üretimi 2.000.000.000 ton olarak gerçekleşmiştir (Anon (a), 2005). Çimento üretimi için tüketilen elektrik enerjisinin %60'ının öğütmeye harcanıldığı (Fujimoto, 1993) düşünülürse, 2004 yılında 138.000 GWh elektrik enerjisi öğütmeye harcanmış olmalıdır. Bu miktarda enerjinin elde edilmesi için yaklaşık 60 milyon ton 2000 kcal/kg ısı değere sahip kömürün %100 verimle yakılması gerekmektedir.

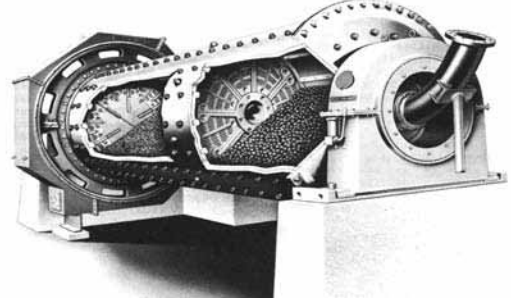
Ülkemizde ise, yıllara göre değişen 30-35 milyon ton çimento üretilmekte (Anon (a), 2005; DPT, 2001) ve bunun için 84-98 milyon ton malzeme ince tane boyutuna öğütülmektedir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar ve tesislerden elde edilen veriler mevcut ekipman ve koşullarda, %10'luk enerji tasarrufunun sağlanabileceğini göstermektedir. Ülkemizde bulunan çimento fabrikalarında bu tasarrufun gerçekleştirilmesi durumunda, sağlanan enerji tasarrufu, her yıl orta büyüklükte bir hidroelektrik santralin enerji üretimine eşit olacaktır.

Çimento öğütmede, yüksek basınçlı merdaneli değirmen ve dikey merdaneli değirmenlerdeki (vertical roller mill) gelişmelere rağmen, en yaygın kullanılan ekipmanlar kamaralı bilyalı değirmenlerdir. Bunlar, boy/çap oranı genellikle 2.5'ten büyük, tüp değirmen olarak da adlandırılan, birinci kamarada iri, ikinci kamarada daha ince bilyaların kullanıldığı, kuru öğütme yapan değirmenlerdir. Açık devre, kapalı devre ve yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerle birlikte kullanıldığı devrelerde uygulama alanı bulmaktadırlar.

Tipik bir kamaralı bilyalı değirmenin görünümü Şekil 1'de sunulmaktadır. Kamaralı bilyalı değirmen ve havalı sınıflandırıcının bulunduğu ve kapalı devre öğütme sistemi ile çalışan bir çimento öğütme devresinde önemli tasarım ve işlem değişkenleri şunlardır:

- Değirmen boyu, çapı
- Değirmen kritik hız oranı
- Değirmen motor gücü
- Bilya çapı, dağılımı ve miktarı
- Ara bölme ızgara tipi

- Değirmen astar tasarımı
- Değirmen hava hızı ve basınç düşmesi
- Besleme malzemesi tane boyu
- Besleme malzemesinin öğütülebilirliği
- Havalı sınıflandırıcı boyu, çapı
- Havalı sınıflandırıcı hava hızı



Şekil 1. Kamaralı bilyalı değirmen genel görünümü.

Bir çimento öğütme devresinde minimum özgül enerji tüketimiyle istenilen ürünün elde edilebilmesi için, uygun ekipmanların ve devre konfigürasyonunun seçilmesi ve yukarıda belirtilen işlem değişkenlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Ancak, kamaralı bilyalı değirmen kullanılan öğütme devrelerine özgü bir tasarım yaklaşımı önerilmemektedir. Bond yöntemi (Bond, 1961) bilyalı değirmenlerin seçiminde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, çimento hammaddeleri, boksit, kil gibi malzemelerin, değirmenin çekeceği güçte değişikliğe neden olabileceği, bu nedenle, bu malzemelerin öğütülmesi için düşünülen bilyalı değirmenlerin seçiminde Bond yönteminin yetersiz kalabileceği ve değirmen üretici firmalarına danışılması gerektiği belirtilmektedir (Rowland ve Kjos, 1980). Ayrıca, modelleme destekli yaklaşımlarda da doğrudan kamaralı bilyalı değirmenlerin tasarımına yönelik bir çalışma bulunmamaktadır.

Bilyalı değirmen seçiminde yaygın olarak kullanılan Bond öğütülebilirlik testi ile modelleme yaklaşımını birleştiren bir yaklaşım Morrell ve Man (1997) tarafından yaş öğütmede kullanılan boğazdan taşmalı bilyalı değirmenler için önerilmiş ve 16 set veri ile başarılı olduğu gösterilmiştir. Erdem vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada ise, bu yöntem kuru öğütme yapan kamaralı bilyalı değirmenler için sınanmış ve yöntemin yetersiz kaldığı belirlenmiştir.

Bu çalışmada, çimento öğütmede kullanılan ve kuru öğütme yapan kamaralı bilyalı değirmenlerin seçimi ve devre tasarımı için modelleme ve simülasyon destekli bir ölçek büyütme yaklaşımı kullanılmıştır. Yaklaşım, halen çalışmakta olan farklı sekiz çimento öğütme devresinden alınan verilerle sınanmıştır.

2. MODELLEME YAKLAŞIMI

Kamaralı bilyalı değirmenler için önerilen modelleme yaklaşımları az sayıdadır. Austin vd. (1982), Viswanathan vd. (1988), Zhang (1992) ve Benzer (2000) bu konuda çalışmalar yapan araştırmacılarıdır. Bu çalışmalar içinde, endüstriyel verilerle sınanmış ve ara bölme ızgarasının etkisinin modele yansıtılabildiği tek yaklaşım, Whiten (1974) tarafından geliştirilen mükemmel karışım (perfect mixing) modelini kullanan Benzer (2000) yaklaşımıdır.

Whiten (1974) tarafından geliştirilen ve değirmende herhangi bir tane fraksiyonu için kararlı durumda madde denkliliğinin sağlandığı koşulu ifade eden mükemmel karışım model yaklaşımının matematiksel ifadesi Eşitlik 1'de sunulmaktadır.

$$f_i - P_i + \sum_{j=1}^i a_j \left(\frac{r_j}{d_j} \right) P_j - \left(\frac{r_i}{d_i} \right) P_i = 0 \quad (1)$$

f_i : i boyut fraksiyonunda değirmene giren malzeme miktarı (ton/saat)

P_i : i boyut fraksiyonunda değirmenden çıkan malzeme miktarı (ton/saat)

a_j : Boyut küçültme işlemi sırasında j boyut fraksiyonundaki malzemenin kendinden ince boylara hangi oranlarda dağılacığını gösteren kırılma dağılım fonksiyonu (boyutsuz)

r_i : i boyut fraksiyonundaki malzemenin kırılma hızı (1/saat)

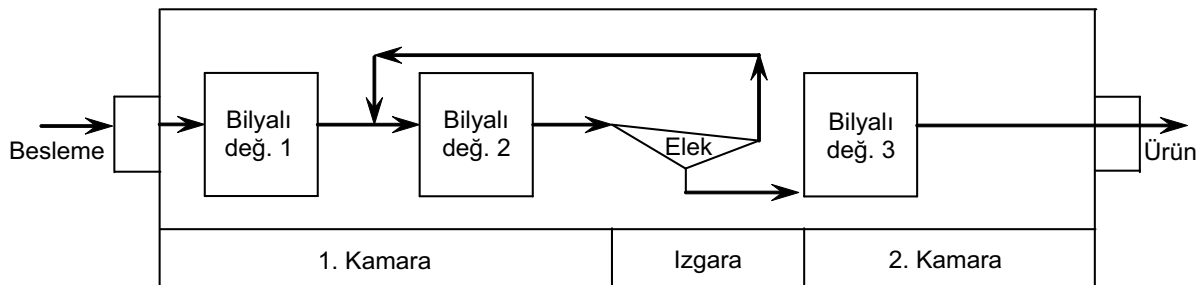
d_i : i boyut fraksiyonundaki malzemenin taşınma hızı (1/saat)

r/d_i : Kırılma hızı parametresi (boyutsuz) Zhang (1992), kamaralı bilyalı değirmenler için mükemmel karışım modelini ilk öneren araştırmacı olmasına karşın, değirmeni tek bir birim olarak modellemesi nedeniyle, iki kamarayı ayrı birimler olarak değerlendirmemiş ve ara bölme ızgarasının performans üzerine etkisini yansıtamamıştır.

Benzer vd. (2000), değirmen içinde her iki kamaradan aldıkları numunelerin boyut dağılımlarında, iri tanelerin hızlı bir şekilde kırıldığını ve ara bölme ızgarasının bir sınıflandırıcı gibi davrandığını göstermişlerdir. Buna göre, birinci kamarayı iki mükemmel karışimli değirmene bölünmüş ve ara bölme ızgarası bir sınıflandırıcı olarak ele alınmıştır. Birinci kamarayı temsil eden değirmenlerden ikinci kamaraya yakın olanı, ara bölme ızgarası ile kapalı devre çalıştığı yaklaşımı ile modellenmiştir. İkinci kamaraya ise, tek mükemmel karışimli bilyalı değirmen olarak modellenmiştir. Bu yaklaşımın model yapısının şematik olarak ifadesi Şekil 2'de görülmektedir.

3. KULLANILAN ÖLÇEK BÜYÜTME YAKLAŞIMI VE HESAPLAMALAR

Bu çalışmada kullanılan ölçek büyütme yaklaşımı Şekil 3'te şematik olarak sunulmaktadır. Başlangıçta, Morrell ve Mann (1997) yönteminin ilk aşamasında olduğu gibi, Eşitlik 1'de verilen mükemmel karışım modeli, Broadbent ve Calcott kırılma dağılım fonksiyonu (Lynch, 1977) ve Bond bilyalı değirmen öğütülebilirlik testinin son çevriminde belirlenen değirmen besleme ve ürün boyut dağılımları kullanılarak Bond bilyalı değirmeni için kırılma hızı parametre değerleri (r/d_i) belirlenmektedir. Daha sonra, elde edilen



Şekil 2. Benzer (2000) yaklaşımında model yapısının şematik gösterimi

bu model parametresine, Avustralya'da Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRC) bünyesinde geliştirilen, Eşitlik 2'de verilen matematiksel ifade (Napier-Munn vd., 1996) ve diğer ilişkiler yardımıyla tasarım ve işlem değişkenlerinin etkisi yansıtılarak ölçek büyütme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bond bilyalı değirmen ve büyük ölçekli değirmenlerde kullanılan besleme malzemesi boyut dağılımları arasındaki farklılık, her bir tane boyu fraksiyonunda kalan malzemenin % ağırlıkları arasındaki orandan yararlanılarak yansıtılmaktadır (Man, 2000).

$$\frac{r/d_{yeni}}{r/d_{eski}} = \left(\frac{D_{yeni}}{D_{eski}}\right)^{0.5} \times \left(\frac{1-E_{yeni}}{1-E_{eski}}\right) \times \left(\frac{E_{yeni}}{E_{eski}}\right) \times \left(\frac{C_{yeni}}{C_{eski}}\right) \times \left(\frac{W_{yeni}}{W_{eski}}\right)^{0.8} \quad (2)$$

r/d : Kırılma hızı parametresi
D : Değirmen çapı (m)
LF : Değirmen şarj oranı (%)
Cs : Değirmen kritik hız yüzdesi (%)
WI : İş indeksi değeri, kWh/t

Son aşamada ise, ölçek büyütme çalışması ile hesaplanan kırılma hızı parametre değerleri kullanılarak simülasyon yoluyla büyük ölçekli kamaralı bilyalı değirmenin bulunduğu devre performansı tahmin edilmektedir. Sonuçta; prosese uygun değirmen seçilebilmekte ve kullanılması düşünülen havalı sınıflandırıcı ve ara bölme ızgarasının modellerinin tesis verileriyle oluşturulması durumunda devre tasarımı için gerekli bilgiler sağlanmaktadır.

İkikamaralı birbirinden ayrı araba bölme ızgaraları ve devrelerde kullanılan havalı sınıflandırıcılar için tasarım ve işletme değişkenleri ile model parametreleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan matematiksel eşitlikler bulunmamaktadır. Bu nedenle, ara bölme ızgarası ve havalı sınıflandırıcılar için gerekli olan matematiksel modeller, ifadesi Eşitlik 3 ile verilen Whiten'in partiyon eğrisi modeli (Napier-Munn vd., 1996) kullanılarak tesis verileriyle oluşturulmakta ve model parametre değerleri belirlenmektedir. Izgara ve havalı sınıflandırıcıların modellenmesi ile ilgili daha detaylı bilgi literatürde verilmektedir (Benzer vd., 2000; Lynch vd., 2000, ve Benzer vd., 2001).

$$E_{OA} = C \cdot \left[\frac{(1 + \beta \cdot \beta^* \cdot x)(e^\alpha - 1)}{e^{(\alpha \cdot \beta^* \cdot x)} + e^{\alpha - 2}} \right] \quad (3)$$

E_{OA}: Beslemenin incelere giden oranı olarak tanımlanan partiyon katsayısı

C : Sınıflandırma işlemine maruz kalan oran
α : Ayrımın keskinliğini gösteren model parametresi
β : Olta eğrisini tanımlayan model parametresi
β* : Düzenleme parametresi
x : d/d_{50c}
d : Tane boyu
d_{50c}: Alt ve üst akıma gitme olasılığı eşit olan tane boyu

Çalışmada kullanılan yaklaşımın geçerliliğini sınamak üzere, hesaplanan değerlerle halen çalışmakta olan çimento öğütme devrelerinde ölçülen sonuçlar karşılaştırılmış ve birlikte bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

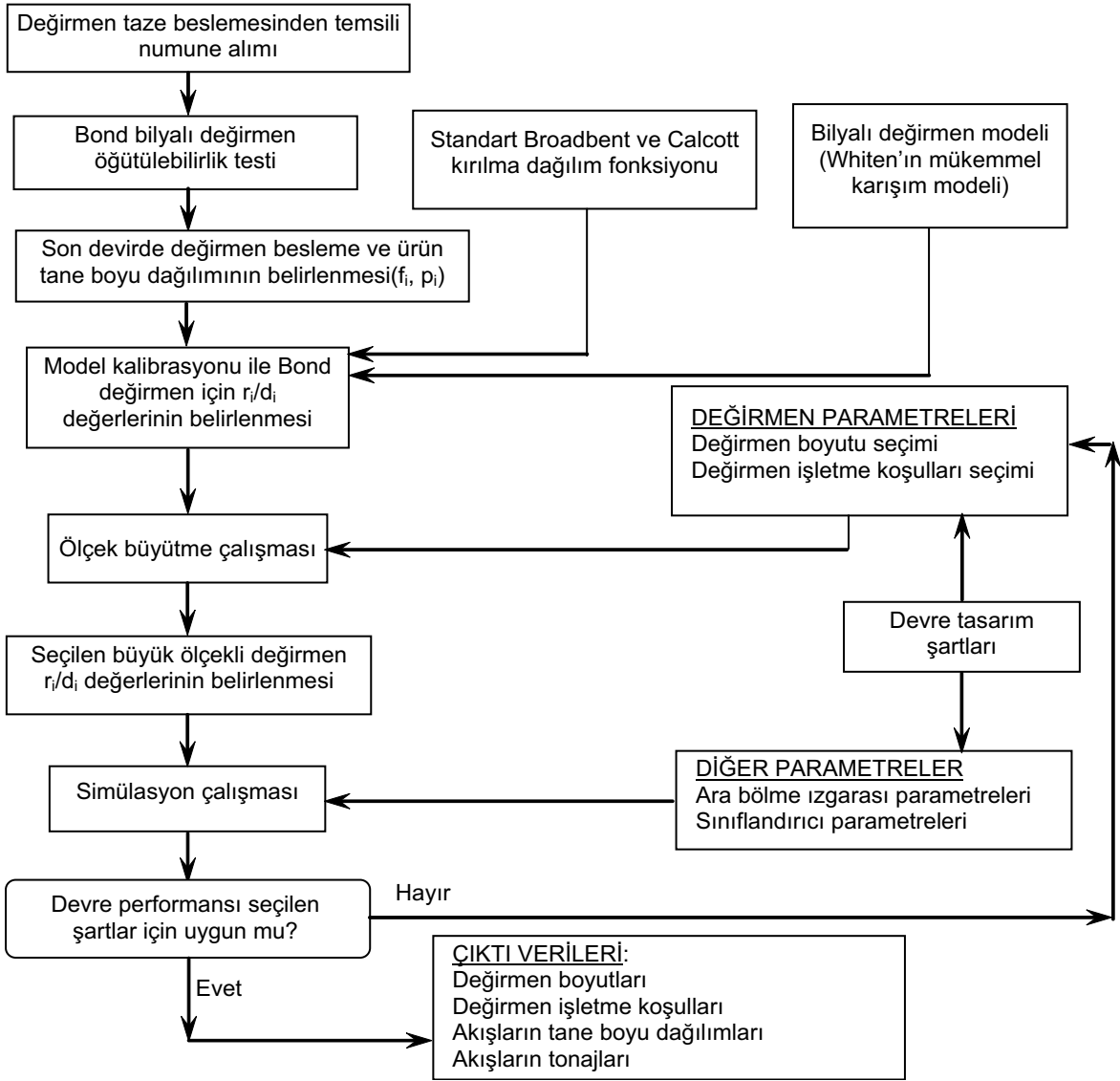
Bu amaçla, sekiz farklı çimento öğütme devresinde örnekleme çalışmaları yürütülmüştür. Tesislerde yürütülen örnekleme çalışmaları, alınan numunelerle laboratuvarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, JKSimMet bilgisayar programında örneklenen her bir devre için yapılan madde denkliği çalışmaları, öğütülebilirlik testlerinde Bond bilyalı değirmende gerçekleşen öğütmenin sayısal olarak ifadesi için modelleme çalışmalarının nasıl yapıldığı ve belirlenen model parametre değerleri Erdem vd. (2005) çalışmasında detaylı olarak sunulmaktadır.

Bu çalışmaları takiben ölçek büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te açıklanan yöntem izlenerek ve Çizelge 1'de verilen teknik bilgiler kullanılarak, D öğütme devresinde bulunan kamaralı bilyalı değirmenin performansını tahmin etmek için yapılan ölçek büyütme işlemi sayısal olarak açıklayan örnek bir çalışma Çizelge 2'de verilmektedir.

1 ve 2. katsayı değerleri: Çizelge 1'deki değirmen bilgileri ve Eşitlik 2 ile verilen matematiksel ifade kullanılarak Benzer (2000) yaklaşımının model yapısında her iki kamaradaki değirmenler için ayrı ayrı bulunan katsayı değerleridir.

3. katsayı değerleri: Her tane boyundaki kırılma hızı parametresi için farklı olan 3. katsayı değerleri, Bond bilyalı değirmen ve büyük ölçekli bu değirmenin taze beslemelerinin % ağırlıklarının oranlanmasıyla elde edilmektedir.

Öğütme devresinde kullanılan havalı sınıflandırıcı ve ara bölme ızgarası için, tesis verileri kullanılarak Eşitlik 3'ten hesaplanan model parametreleri Çizelge 3'te verilmektedir.



Şekil 3. Kullanılan ölçek büyütme yaklaşımının şematik gösterimi.

Çizelge 1. Ölçek Büyütme İşlemi İçin Gerekli Bond ve Büyük Ölçekli Bilyalı Değirmen Teknik Özellikleri

Büyük ölçekli değirmen çapı	3,27 m
Büyük ölçekli değirmen 1. kamara 1. ve 2. değirmen uzunluğu	2,80 m - 0,80 m
Büyük ölçekli değirmen 2. kamara uzunluğu	7,00 m
Büyük ölçekli değirmen devir sayısı	17 dev/dk
Büyük ölçekli değirmen kritik hız oranı	%72,67
Büyük ölçekli değirmen 1. ve 2. kamara şarj oranı	29,80 - % 27,20
Bond bilyalı değirmen çapı ve uzunluğu	0,305 m
Bond bilyalı değirmen devir sayısı	70 dev/dk
Bond bilyalı değirmen kritik hız oranı	%88,78
Bond bilyalı değirmen şarj oranı	%22,70

Çizelge 2. D Öğütme Devresi İçin, Kullanılan Ölçek Büyütme Yöntemiyle Bond Bilyalı Değirmen Kırılma Hızı Parametre (r/d) Değerlerinden Büyük Ölçekli Değirmen Kırılma Hızı Parametre (r/d) Değerlerinin Belirlenmesi

Tane Boyu (mm)	Bond Bilyalı Değirmen r/d *	1. Katsayısı	2. Katsayısı	Yeni r/d * (1. kamara değ. için)	Yeni r/d * (2. kamara değ. için)	Tane Boyu (mm)	Bond Bilyalı Değ. Taze Besleme (% ağırlık)	Büyük Ölçekli Değ. Taze Besleme (% ağırlık)	3. Katsayı	Büyük Ölçekli Değ. r/d * (1. kamara değ. için)	Büyük Ölçekli Değ. r/d * (2. kamara değ. için)
2,360	1,77000	3,1953	3,0245	5,65569	5,35343	2,360	23,32	4,93	4,73	26,75229	25,32258
1,700	2,01000	3,1953	3,0245	6,42256	6,07932	1,700	21,32	3,49	6,11	39,22704	37,13064
1,180	2,29000	3,1953	3,0245	7,31724	6,92619	1,180	14,91	2,76	5,40	39,53964	37,42653
0,850	2,40000	3,1953	3,0245	7,66873	7,25889	0,850	9,42	2,22	4,24	32,53512	30,79636
0,600	2,09000	3,1953	3,0245	6,67818	6,32128	0,600	6,42	1,81	3,55	23,69082	22,42472
0,425	1,54000	3,1953	3,0245	4,92077	4,65779	0,425	4,77	1,51	3,16	15,55997	14,72840
0,300	0,98660	3,1953	3,0245	3,15249	2,98401	0,300	3,97	1,35	2,94	9,27567	8,77996
0,212	0,57490	3,1953	3,0245	1,83698	1,73881	0,212	2,86	0,97	2,95	5,41305	5,12377
0,150	0,31590	3,1953	3,0245	1,00940	0,95545	0,150	2,61	0,74	3,53	3,56001	3,36975
0,106	0,17010	3,1953	3,0245	0,54352	0,51447	0,106	2,04	0,81	2,52	1,37207	1,29874
0,075	0,09317	3,1953	3,0245	0,29771	0,28180	0,075	2,13	0,79	2,70	0,80348	0,76054
0,053	0,05344	3,1953	3,0245	0,17076	0,16163	0,053	1,44	0,70	2,05	0,35029	0,33157
0,038	0,03141	3,1953	3,0245	0,10036	0,09500	0,038	1,23	0,56	2,19	0,21969	0,20794

Çizelge 3. Havalı Sınıflandırıcı ve Ara Bölme Izgarası İçin Hesaplanan Model Parametre Değerleri

Model Parametresi	Ara Bölme Izgarası	Havalı Sınıflandırıcı
C	100	87,57
α	1,00	0,6297
β	0,00	1,05
d_{50c}	0,25	0,06332
β^*	1,00	3,29

4. ÖLÇEK BÜYÜTME ÇALIŞMALARININ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışmanın son aşamasında, ölçek büyütme işlemleri sonucunda belirlenen bilyalı değirmen model parametre değerleri ve tesis verileriyle belirlenen ara bölme ızgarası ve havalı sınıflandırıcı model parametre değerleri yardımıyla, yalnızca büyük ölçekli değirmen taze besleme boyut dağılımı ve tonajı kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Ölçülen ve bu çalışmada kullanılan yaklaşımla hesaplanan tane boyu dağılımları Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bütün devrelerde ölçülen ve hesaplamalar sonucunda tahmin edilen boyut dağılımlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. İri boylarda gözlenen sapmaların -3.35mm malzeme kullanılarak yapılan öğütülebilirlik testi sonuçları kullanılarak belirlenen model parametrelerinin, öğütme devrelerine beslenen -38mm klinkerin tane boyuna ölçek büyütmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna karşın, bu sapmalar kabul edilebilir sınırlar içerisinde olmuştur. Açık devre öğütme yapan devrelerden elde edilecek verilerle bu konuda daha duyarlı ilişkilerin geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Değirmenlerin devreden yük tonajlarının karşılaştırılması ise, Çizelge 4'te verilmektedir. Ölçülen ve hesaplanan malzeme boyut dağılımları arasındaki uyuma bağlı olarak tüm devrelerde hesaplanan devreden yük tonajları, madde denkliği ile belirlenen değerlere oldukça yakın bulunmuştur.

Bond yöntemi, bilyalı değirmen boyutlandırılması ve değirmenin çektiği gücün belirlenmesi işleminde, kendini endüstriyel alanda kanıtlamış bir yöntem olmasına karşın, besleme ve ürünün tane boyu dağılımlarının yalnızca malzemenin %80'inin geçtiği tek bir tane boyuyla ifade edilmesi ve kapalı devre öğütmede sınıflandırıcı performansına bağlı olarak devredeki değişimlerin

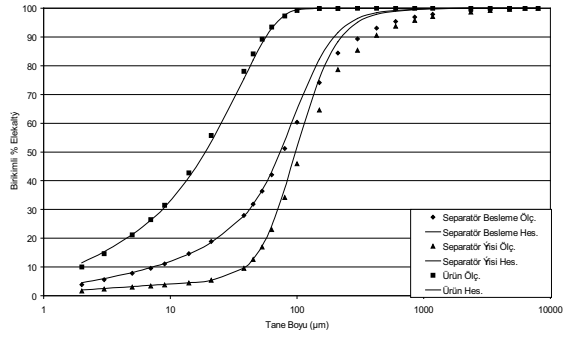
hesaplanamaması önemli eksiklikleridir.

Bu çalışmada kullanılan yaklaşım, Bond yönteminin dezavantajlarını ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, Bond bilyalı değirmen öğütülebilirlik testini temel alarak, diğer modelleme yaklaşımlarında mevcut olan kesikli öğütme koşullarının seçimi sorununu güvenilir bir standarda bağlamaktadır.

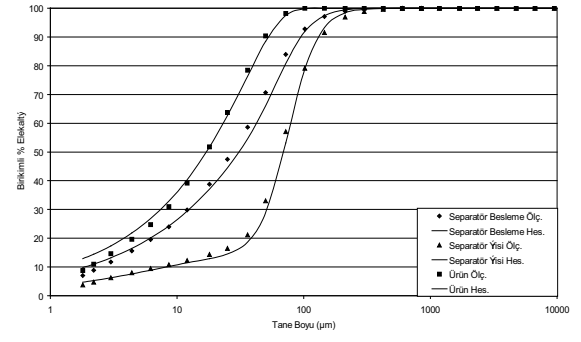
Mükemmel karışım yaklaşımı, öğütme işlemini tek parametreye (r/d) indirgemekte ve bu parametrenin işletme ve tasarım değişkenleri ile ilişkisini tanımlamak mümkün olmaktadır. Çok sayıda parametre içeren diğer yaklaşımlarda ise, model parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan dizgeler gereği, aynı çözümü veren birden fazla parametre seti elde etmek mümkün olmaktadır. Bu durumda, ölçek büyütme için gerekli eşitlikleri elde etmek güçleşmektedir. Bu çalışmada kullanılan ölçek büyütme yaklaşımı Bond öğütülebilirlik testinden elden edilen parametrelerin ölçek büyütülmesinde duyarlı sonuçlar vermiştir. Bu karşın, yeterli araştırma yapılmamış olmasından dolayı hava hızı gibi etkisi yansıtılmayan değişkenler de bulunmaktadır. İleride yapılacak olan çalışmalarla kullanılan yöntemin duyarlılığının artırılması mümkün görünmektedir.

Ara bölme ızgarası ve havalı sınıflandırıcı modelleri tesis verileri kullanılarak belirlenmiştir. Bu konuda yapılacak çalışmalarla yaklaşım daha da duyarlı hale gelecektir.

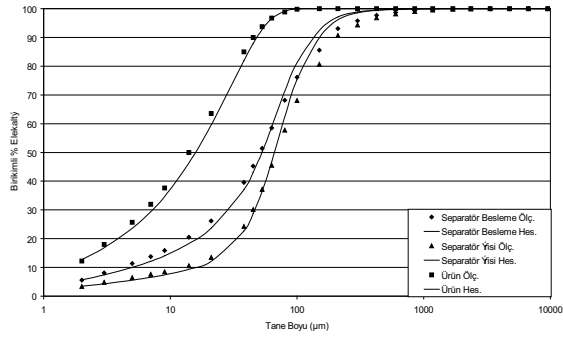
Çimento öğütmede, doğru ekipman seçimi ve devre tasarımı üretim maliyetleri ve karlılık açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan yaklaşım, sınırlı sayıda veri ile de olsa, kamaralı bilyalı değirmen kullanılan çimento öğütme devrelerindeki tane boyu dağılımlarının ve malzeme tonajların belirlenmesinde başarılı bulunmuştur. Farklı devre konfigürasyonuna sahip devrelerden alınacak verilerle geçerliliğinin sınanması güvenilirliğini artıracaktır.



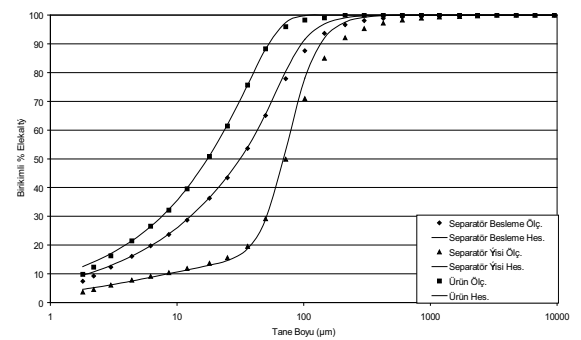
a – A Öğütme Devresi



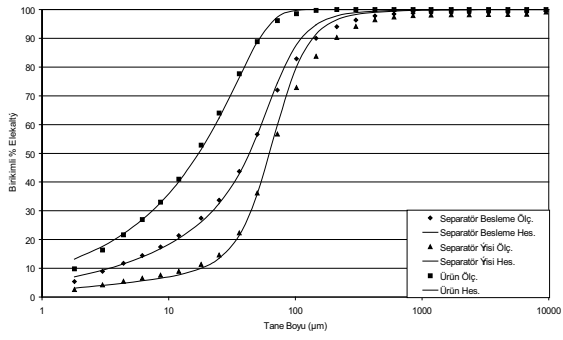
e – E Öğütme Devresi



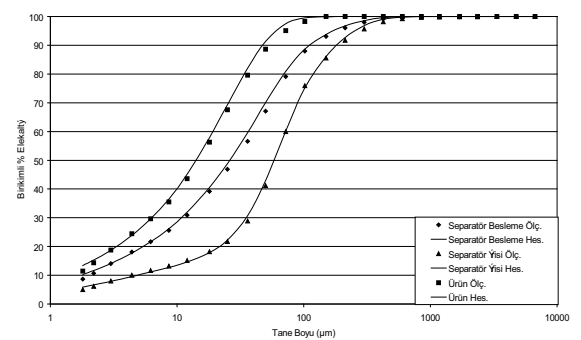
b – B Öğütme Devresi



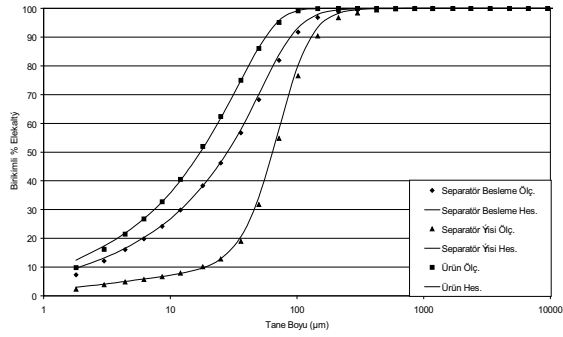
f – F Öğütme Devresi



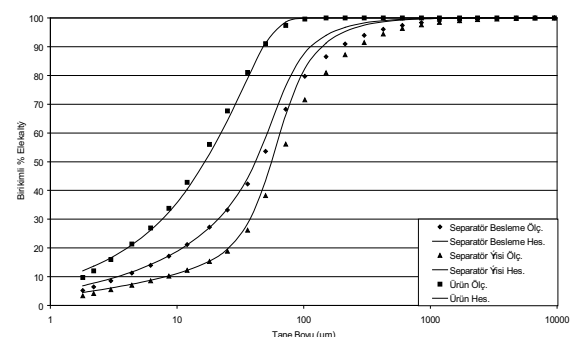
c – C Öğütme Devresi



g – G Öğütme Devresi



d – D Öğütme Devresi



h – H Öğütme Devresi

Şekil 4. Örneklenen devrelerin akış kollarında ölçülen ve kullanılan yöntem ile hesaplanan tane boyu dağılımları.

Çizelge 4. Örneklenen Devrelerde Ölçülen ve Kullanılan Yöntemle Belirlenen Değirmen Devreden Yük Tonajları

Numune Yeri	Ölçülen Devreden Yük Tonajı (t/s)	Kullanılan Yöntem ile Hesaplanan Devreden Yük Tonajı (t/s)	Hata Değeri %
A Öğütme Devresi	282,67	282,97	+0,11
B Öğütme Devresi	261,91	273,16	+4,3
C Öğütme Devresi	101,08	100,05	-1,02
D Öğütme Devresi	31,44	29,46	-6,30
E Öğütme Devresi	20,21	23,22	+14,89
F Öğütme Devresi	33,97	32,46	-4,44
G Öğütme Devresi	64,55	60,07	-6,94
H Öğütme Devresi	383,98	348,06	-9,35

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Bond bilyalı değirmen öğütülebilirlik testinden elde edilen verilerin modellenmesine dayanan bir ölçek büyütme yöntemi kullanılmış ve sekiz farklı öğütme devresinden alınan verilerle geçerliliği sınanmıştır.

Sonuç olarak, endüstriyel verilerle sınanan bu yaklaşım kamaralı bilyalı değirmen seçiminde ve devre tasarımında başarılı bulunmuştur.

Yöntem, geliştirilip genelleştirilmesi için, farklı değirmen boyutlarına, tasarımına ve işletme koşullarına sahip çimento öğütme devrelerinden alınacak verilerle sınanmalıdır.

KAYNAKLAR

Anon(a), 2005; "U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2005" <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>

Austin, L. G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. T., Rogers, R. S. C., 1982; Simulation of Grinding Circuits for Design, Design and Installation of Comminution Circuits, AIME Inc, New Jersey, Editor; Mular, A. L., Jergensen, G. V., Chapter 19, 301-324.

Benzer, A. H., 2000; Klinker Öğütme Prosesinin Matematiksel Modellenmesi, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi.

Benzer, H., Ergün, L., Öner, M. and Lynch A. J., 2001; "Simulation of Open Circuit Clinker Grinding", Minerals Engineering, **14**, (7), 701-710.

Benzer, H., L. Ergün, Lynch A. J., Öner, M., Günlü, A., Çelik, İ. B. and Aydoğan, N., 2001; "Modelling Cement Grinding Circuits", Minerals Engineering, **14**, (11), 1469-1482.

Bond, F. C., 1961; "Crushing and Grinding Calculations, Part I", British Chemical Engineering, **6**, (6), 378-385.

Bond, F. C., 1961; "Crushing and Grinding Calculations, Part II", British Chemical Engineering, **6**, (8), 543-548.

DPT, 2001; Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.

Erdem, A. S., Ergün, Ş. L., Benzer, A. H., 2005; "Modelleme Yardımıyla Çimento Öğütme Devresi Tasarımında Morrell Ve Man Yönteminin Sınanması", Madencilik, **44**, (4), 3-17.

Fujimoto, S., 1993; "Reducing Specific Power Usage in Cement Plant", *World Cement*, (7), 25-35.

Lynch, A. J., 1977; *Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Simulation, Optimization, Design and Control*, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 340.

Lynch, A. J., Öner, M., Benzer, A. H., 2000; "Simulation of Closed Cement Grinding Circuit", *ZKG International*, **53**, (10), 560-567.

Man, Y. T., 2000; *A Model-Based Procedure for Scale-Up of Wet, Overflow Ball Mills*, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre Department of Mining, Minerals and Materials Engineering, Degree of Doctor of Philosophy, The University of Queensland, February.

Morrell, S., Man, Y. T., 1997; "Using Modelling and Simulation for the Design of Full Scale Ball Mill Circuits", *Minerals Engineering*, **10**, (12), 1311-1327.

Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., Kojovic, T., 1996; *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation*, Editor; Napier-Munn, T. J, 413.

Viswanathan, K., Narang, K. C., 1988; "Computer Simulation an Optimisation of Ball Mills/Circuits", *World Cement*, (19), 143-148.

Rowland, C. A., Kjos, D. M., 1980, "Rod and Ball Mills", *Mineral Processing Plant Design*, 2nd Edition, SME Inc, New York, Editors; Mular, A. L., Roshan, B. B., Chapter 12, 239-277.

Whiten, W. J., 1974; "A Matrix Theory of Comminution of Machines", *Chemical Engineering Science*, **29**, 589-599.

Zhang, Y. M., 1992; *Simulation of Comminution and Classification in Cement Manufacture*, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre Department of Mining, Minerals and Materials Engineering, Degree of Doctor of Philosophy, The University of Queensland, 1992.